بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

شبیه سازی لیزر تار نوری دو غلافی ایتربیم با توان خروجی زیاد

معین کردی بروجنی[۱] ، آذردخت مظاهری[۱] ، محمود سلطان الکتابی[۲] و مهدی دهقان [۲]

[۱]دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[۲] دانشگاه اصفهان

چکیده– یک لیزر تارنوری با طول موج دمش ۹۱۵ نانومتر و طول موج خروجی ۱۰۶۴ نانومتر شبیه سازی شده است. طول بهینه تارنوری ۴۰متر، بازده لیزر برای دمش از ابتدای تار ۶۰ درصد و برای دمش از انتها ۶۲/۴ درصد است. همچنین، توان آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته برای دمش از ابتدا و انتهای تارنوری و تاثیری که رشد موج بریلوئن بر موج لیزر دارد، تعیین شده است. توان آستانه بریلوئن برای دمش از ابتدا ۸۶۶/۸ وات و برای دمش از انتها ۱۰۸۹ وات است. درآخر نیز وابستگی توان آستانه بریلوئن به پهنای خط لیزر مشخص شده است.

کلید واژه- پراکندگی بریلوئن برانگیخته، تار نوری دو غلافی، لیزر تار نوری ایتربیم

Simulation of high-power Ytterbium double-clad fiber laser

M. Kordi borujeni[1], A. Mazaheri[1], M. Soltanolkotabi[2] and M. Dehgan[2]

[1] Malek_e_Ashtar University of Technology

[2] University of Isfahan

Abstract- A high power Ytterbium-doped fiber laser is simulated in this paper. Its pump and output wavelength is 915nm and 1064nm, correspondingly. The output power characteristics of the linear cavity fiber laser have been studied theoretically by solving the rate equations. The optimum length of the fiber and laser efficiency for forward and backward pumpings are obtained 40m, 60% and 62.4%, correspondingly. Also, the threshold powers of stimulated Brillouin scattering are determined for forward pumping, 866.8 W, and backward pumping, 1089 W. Finally, dependence of Brillouin threshold power to laser linewidth is determined.

Keywords: Double-clad fiber, Stimulated Brillouin scattering, Ytterbium fiber laser

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

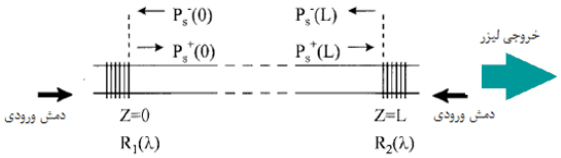
مقدمه

امروزه، لیزرهای تار نوری دو غلافی آلاییده شده به ایتربیوم به دلیل بازده بالا، کم حجم بودن، کیفیت پرتو مناسب و امکان کنترل خوب گرما توجه زیادی را به خود جلب کرده است[۱]. با استفاده از لیزرهای نیم رسانای مناسب برای دمش، می‌توان به توان خروجی پیوسته چند صد واتی در این لیزرها دست یافت[۲]. گرچه، پایداری خروجی لیزرهای تار نوری می‌تواند به وسیله اثرات غیرخطی محدود گردد. دراین میان پراکندگی بریلوئن برانگیخته که آستانه پایین‌تری در لیزرهای پیوسته تار نوری دارد، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله، ابتدا یک لیزر تار نوری را با حل معادلات نرخ جفت شده آن، شبیه سازی می‌کنیم و طول بهینه تار نوری، بازده و توان آستانه لیزر را به دست می‌آوریم. سپس، پراکندگی بریلوئن برانگیخته را در نظر گرفته و توان آستانه پراکندگی را برای دمش از ابتدا و انتهای تار تعیین می‌کنیم.

الگوسازی و نتایج شبیه‌سازی

ساختار یک کاواک لیزر تار نوری پیوسته که از دو جهت دمش می‌شود، به صورت زیر است. طول تار نوری ایتربیوم L، ضریب بازتاب توری براگ ورودی R_1 وضریب بازتاب توری براگ خروجی R_2 است.



شکل ۱ : ساختار دمش از دو جهت یک لیزر تار نوری

معادلات نرخ جفت شده حالت پایا به همراه پراکندگی بریلوئن برای لیزرهای تار نوری پیوسته به صورت زیر است:

$$\frac{N_2}{\tau}=\frac{\Gamma_P\lambda_P}{hcA}[\sigma_a(\lambda_P)N_1-\sigma_e(\lambda_P)N_2](P_P^+ + P_P^-)+ \frac{\Gamma_S\lambda_S}{hcA}[\sigma_a(\lambda_S)N_1-\sigma_e(\lambda_S)N_2](P_S^+ + P_S^-) \quad (۱)$$

$$\frac{dP_P^{\pm}}{dz}=\pm\Gamma_P[\sigma_e(\lambda_P)N_2-\sigma_a(\lambda_P)N_1]P_P^{\pm}\mp\alpha(\lambda_P)P_P^{\pm} \quad (۲)$$

$$\frac{dP_S^{\pm}}{dz}=\pm\Gamma_S[\sigma_e(\lambda_S)N_2-\sigma_a(\lambda_S)N_1]P_S^{\pm}\mp\alpha(\lambda_S)P_S^{\pm} \mp\frac{g_B}{A_{eff}}P_B^{\mp}P_S^{\pm} \quad (۳)$$

$$\frac{dP_B^{\pm}}{dz}=\pm\frac{g_B}{A_{eff}}P_S^{\mp}P_B^{\pm}\mp\alpha(\lambda_R)P_B^{\pm} \quad (۴)$$

در روابط بالا، $N=N_1+N_2$ مقدار چگالی یون ایتربیوم در هسته تارنوری، $N_2(z)$ چگالی جمعیت در تراز بالا لیزر، σ_{ap} و σ_{ep} به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل القایی در طول موج دمش، σ_{aS} و σ_{eS} به ترتیب سطح مقطع جذب و گسیل القایی در طول موج لیزر است. A سطح مقطع هسته تار نوری و A_{eff} سطح مقطع موثر هسته تارنوری می‌باشد. $P_p^{\pm}(z)$ توان موج دمش، $P_S^{\pm}(z)$ توان موج لیزر و $P_B^{\pm}(z)$ توان موج استوکس مرتبه اول بریلوئن است($\pm$ بیانگر جهت انتشار پیش‌رو و پس‌رو موج است). Γ_P و Γ_S، به ترتیب ضریب‌های هم‌پوشانی و ν_P و ν_S بسامدهای موج دمش و موج لیزر، h ثابت پلانک، c سرعت نور، τ زمان فروافت خود به‌خودی تراز لیزر، α_P و α_S و α_B به ترتیب ضریب جذب محیط میزبان برای موج‌های دمش، لیزر و بریلوئن است. g_B نیز ضریب بهره پراکندگی بریلوئن می‌باشد و به صورت زیر است:

$$g_B=g_0\frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B+\Delta\nu_s} \quad (۵)$$

که در آن $\Delta\nu_B$ و $\Delta\nu_S$ به ترتیب پهنای خط موج بریلوئن و لیزر و g_0 نیز ثابت ذاتی بهره بریلوئن است.

برای حل معادلات نرخ جفت شده باید از شرایط مرزی موجود برای بازتاب موج‌های لیزر و بریلوئن استفاده نمود. شرایط مرزی در نقاط $z=0$ و $z=L$ به صورت زیر هستند:

$$P_S^+(0)=R_{1S}P_S^-(0) \quad \text{و} \quad P_S^-(L)=R_{2S}P_S^+(L) \quad (۶)$$

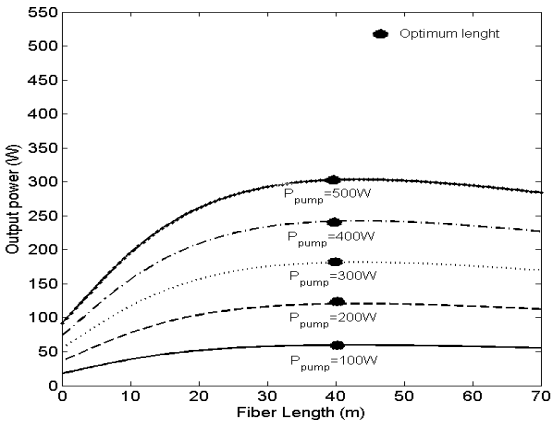
$$P_B^+(0)=R_{1B}P_B^-(0) \quad \text{و} \quad P_B^-(L)=R_{2B}P_B^+(L) \quad (۷)$$

با توجه به شریط مرزی و استفاده از روش تیراندازی معادلات جفت شده حل می‌شوند. برای تصحیح مقدار اولیه از روشی که در مرجع[۳] آمده، استفاده شده است. مشخصات لیزر تارنوری به صورت زیر می‌باشد:

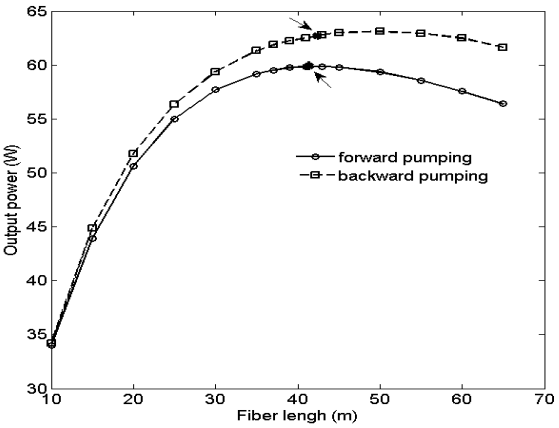
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

$\lambda_p = ۹۱۵\text{nm}$ طول‌موج دمش، $\lambda_S = ۱۰۶۴\text{nm}$ طول-موج لیزر، $R_{1p,2p} = ۴$ درصد، $R_{1S,1B} = ۹۹/۳$ درصد، $R_{2S,2B} = ۱۰/۳$ درصد ، $\Gamma_p = ۰/۰۰۲۵$، $\Gamma_S = ۰/۸۲$، $D_c = ۲۰\ \mu m$، $\tau = ۱/۳$ ms قطر هسته تار نوری، $\Delta\nu_S = ۵۵\,GHz$، $\Delta\nu_B = ۵۰\ MHz$، $\alpha_p = ۰/۰۰۳$ و $\alpha_B = \alpha_S = ۰/۰۰۵\,m^{-1}$ است. دیگر مشخصات تارنوری در سایت اینترنتی نوفرن آمده است[۴].

برای توان‌های دمش کوچک (در حدود چند ده وات) طول بهینه لیزر تار نوری به توان دمش لیزر بستگی دارد. اما اگر توان دمش در حدود چند صد وات باشد، طول بهینه لیزر به توان دمش وابسته نخواهد بود[۵]. شکل زیر توان خروجی لیزر را بر حسب طول آن‌ها، برای چند توان دمش مختلف نشان می‌دهد:

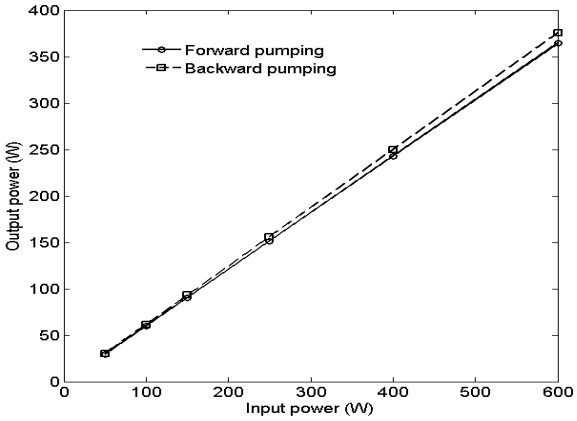


شکل۲: توان خروجی لیزر برحسب طول تار نوری برای چند توان دمش مختلف



شکل۳: توان خروجی لیزر برای دمش از ابتدا و انتها با توان ۱۰۰ وات

با توجه به شکل۲، طول بهینه تار نوری ۴۰ متر می‌باشد و برای توان‌های دمش مختلف یکسان است. از طرف دیگر، طول بهینه برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری تقریبا



شکل ۴: توان خروجی لیزر بر حسب توان دمش ورودی

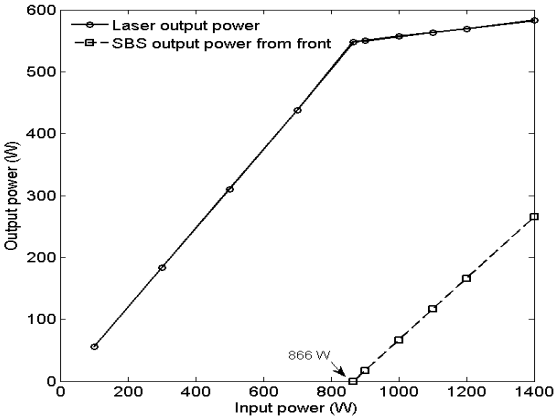
برابر است (شکل۳).

بازده لیزر تار نوری به طول۴۰ متر با رسم نمودار توان خروجی لیزر بر حسب توان دمش آن به دست می‌آید (شکل۴). بازده لیزر برای دمش از ابتدای تار نوری۶۰ درصد و برای دمش از انتهای تارنوری ۶۲/۴ درصد است. دلیل اختلاف بازده لیزر، متفاوت بودن رشد موج لیزر برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری است. رشد اصلی موج لیزر برای دمش از ابتدا، در ابتدای تار نوری و برای دمش از انتها، در انتهای تار نوری است[۶]. بنابراین موج لیزر برای دمش از ابتدا باید طول موثر(L_{eff}) بزرگتری را بپیماید تا از لیزر خارج شود و اتلاف بیشتری خواهد داشت.

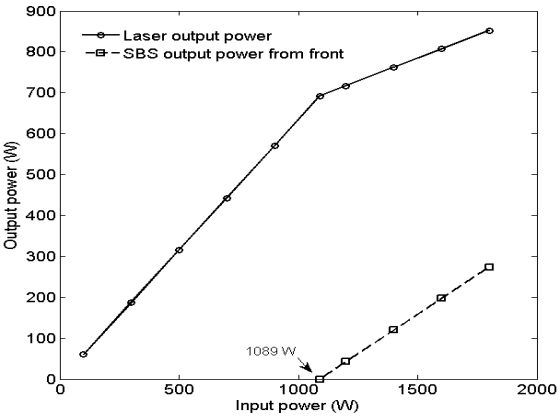
آستانه لیزر کمتر از یک وات می‌باشد. بازده زیاد و توان آستانه کوچک لیزر، از ویژگی‌های لیزرهای تار نوری است. شبیه‌سازی‌های دیگر نیز بر نتایج به دست آمده، تاکید دارند[۶].

اگر توان دمش را افزایش دهیم تا از توان آستانه موج بریلوئن بیشتر شود، موج بریلوئن شروع به رشد می-نماید(شکل ۵ (الف) و ۵ (ب)). با رشد موج بریلوئن بازده خروجی لیزر کاهش می‌یابد. برای دمش از ابتدای تار، شیب موج لیزر از ۰/۶۰ به ۰/۰۶۵ و برای دمش از انتها، شیب موج لیزر از ۰/۶۲۴ به ۰/۳۸۶کاهش یافته است. از طرفی موج بریلوئن، برای دمش از ابتدای تار با شیب ۰/۵ و برای دمش از انتهای تار با شیب ۰/۲۲ رشد می‌کند. علاوه بر اینکه رشد موج بریلوئن سبب کاهش بازده خروجی لیزر می‌شود، باعث ایجاد خود تپی در داخل تار نوری و آسیب به تار نیز می‌گردد[۷]. در این لیزر تار

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



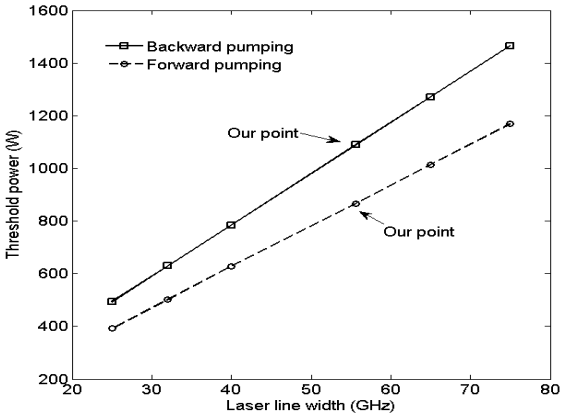
شکل۵ (الف): خروجی موج لیزر و موج بریلوئن برای دمش از ابتدا



شکل۵ (ب): خروجی موج لیزر و موج بریلوئن برای دمش از انتها

نوری ، برای دمش از ابتدا توان آستانه بریلوئن ۸۶۶/۸ وات و برای دمش از انتها ۱۰۸۹ وات است. به این ترتیب حداکثر توان خروجی لیزر بدون آسیب از پراکندگی بریلوئن برای دمش از ابتدا و انتهای تار نوری به ترتیب، ۵۲۸ وات و ۶۸۴ وات می‌باشد.

با توجه به رابطه ۵، هر چه پهنای خط لیزر بزرگتر باشد، ضریب بهره بریلوئن کوچکتر است. بنابراین، توان آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته بزرگتر خواهد بود. در این شبیه‌سازی پهنای خط موج لیزر خیلی بزرگتر از پهنای خط موج بریلوئن است ($\Delta\nu_s >> \Delta\nu_B$)، بنابراین وابستگی توان آستانه بریلوئن به پهنای خط لیزر، به صورت خطی است(شکل۶). پهنای خط لیزر نیز توسط ساختار کاواک و پهنای خط بازتابی توری های براگ در لیزر تعیین می‌شود. شبیه‌سازی و نتایج آن برای لیزر تارنوری به همراه پراکندگی بریلوئن برانگیخته از نظر کلی (ساختار نمودارها و مرتبه توان‌های آستانه) با نتایج دیگر



شکل۶: توان آستانه بریلوئن برحسب پهنای طیفی لیزر

شبیه سازی ها مطابقت می‌کند[۸و۹].

نتیجه گیری

با حل معادلات نرخ جفت شده حالت پایا، یک لیزر تار نوری با طول موج دمش ۹۱۵ نانومتر و طول موج خروجی ۱۰۶۴ نانومتر شبیه‌سازی گردید. در ابتدا با توجه به مشخصات لیزر، طول بهینه تار و بازده لیزر به دست آمد. پس از آن توان‌های آستانه پراکندگی بریلوئن برانگیخته و تاثیر آن بر خروجی لیزر برای دمش از ابتدا و انتهای تار مشخص گردید. در آخر نیز وابستگی توان آستانه بریلوئن به پهنای خط لیزر مشخص شد.

مراجع

[1] Injeyan, H. and G. Goodno, *High power laser handbook*: McGraw Hill Professional

[2] Jeong, Y.e., et al., *Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power*. **Optics Express**, 2004. 12(25): p. 6088-6092

[3] Lali-Dastjerdi, Z ,.F. Kroushavi, and M.H. Rahmani, *An efficient shooting method for fiber amplifiers and lasers.* **Optics & Laser Technology**, 2008. 40(8): p. 1041-1046

[4] www.nufern.com

[۵] زهره لعلی دستجردی و همکاران، بهینه‌سازی لیزر فیبری دوغلافی آلاییده به ایتربیم، **چهاردهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران**

[6] Xue, D., Q. Lou, and J. Zhou, Comparison of Yb-doped fiber laser with one-end and double-end pumping configuration. **Optics & Laser Technology**, 2007. 39(4): p. 871-874

[7] Upadhyaya, B.N., et al., *Effect of steady-state conditions on self-pulsing characteristics of Yb-doped cw fiber lasers.* **Optics Communications**, 2008. 281(1): p. 146-153

[8] Liu, G. and D. Liu, *Numerical analysis of stimulated Brillouin scattering in high-power double-clad fiber lasers.* **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, 2009. 120(1): p. 24-28

[9] Hekmat, M.J., et al., *Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers.* **Laser Physics**. 2013. 23(2): p. 025104

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]